ChinaXiv合作期刊

doi:10.13866/j.azr.2019.04.04

银川平原草甸湿地土壤养分特征与植物响应①

苏芝屯[1,2]，吴春燕[1,2]，何彤慧[1,2]，乔　斌[1,2]，冯艳琼[1,2]，王筱平[3]

（1. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与教育部重点实验室，宁夏 银川　750021；
2. 宁夏大学西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地，宁夏 银川　750021；
3. 宁夏回族自治区银川市湿地管理办公室，宁夏 银川　750004）

摘　要： 为探究草甸湿地土壤养分特征，阐明草甸湿地土壤养分对植物养分的影响，在银川平原选取3种生境的草甸湿地（沼泽草甸、典型草甸和盐生草甸）作为研究对象，通过野外调查、实验室分析，结合经典统计学方法对土壤养分及植物养分进行分析。结果表明：① 水平梯度上，除全磷（TP）外，3种草甸湿地之间土壤养分含量在土层0～20 cm变化显著（$P<0.05$）。② 在垂直梯度上，全氮（TN）、碱解氮（AN）在盐生草甸中垂直变化不显著（$P>0.05$），但在典型草甸与沼泽草甸垂直方向上波动幅度较大；TP在草甸湿地土壤中垂直变化不显著（$P>0.05$）；速效磷（AP）与速效钾（AK）在草甸湿地表层具有一定程度的富集效应，并且在不同草甸湿地土层垂直方向上变化显著（$P<0.05$）。③ 土壤中C、N和P含量的变化趋势一致；AK与土壤P具有显著的相关性（$P<0.05$）。④ 草甸湿地植物养分均表现为N限制，其中C∶N、C∶P与土壤养分呈负相关，植物N∶P受土壤有机碳（SOC）、AN影响较为显著。

关键词： 草甸湿地；土壤养分；植物养分；银川平原

在干旱半干旱地区草甸湿地属于典型湿地生态系统向陆地生态系统的过渡类型。作为独立的自然综合体，其蕴藏的植物及微生物资源丰富，土壤质量也优于地带性土壤[1]，是潜在肥力很高的土壤类型[2]，往往被作为干旱半干旱区域重要的草地资源乃至后备耕地。目前，国内对于草甸湿地的研究主要集中在高寒区域，马维伟等[3]研究了不同海拔高度下尕海草甸湿地的土壤性状，认为土壤肥力会随着海拔高度的增加而增加；王丽等[4]对拉鲁湿地典型湿草甸的植物群落特征进行了研究，认为水位影响了植物的多样性与生物量；控制实验梯度下发现在放牧、水文扰动、火烧等外界因素的干扰下，湿草甸湿地土壤性质均会发生不同程度的变化[5-6]。银川平原位于西北内陆区域，由于具有便利的引黄灌溉条件，历史上灌排体系的建设利用是形成银川平原现今湿地广布的一个重要原因[7]。草甸湿地主要分布在沟渠边缘和渠间洼地、河湖滩地等地形部位。夏贵菊等[8-9]研究了银川平原草甸湿地土壤的盐分分布及累积特征，但关于银川平原草甸湿地土壤养分及其与植物之间关系的研究鲜有报道。

湿地土壤与植物之间进行各种迁移转换和能量交换[10]，土壤中碳（C）、氮（N）、磷（P）、钾（K）影响植物的生长发育、养分循环、物种组成与多样性等，是维持生态系统结构、功能与稳定的重要机制[11-12]。土壤N、P元素是生态系统中常见的限制性养分，其中土壤全氮（TN）可以作为土壤短期肥力的指标[13]。目前，有关植物、土壤C、N、P元素的研究多采用生态化学计量学[14-15]，反而弱化了在区域大环境下土壤的差异及其规律。本研究选择3种草甸湿地（沼泽草甸、典型草甸、盐生草甸），通过测定不同土层土壤理化性质以及植物的养分，探讨了不同生境草甸湿地土壤养分特征，分析了草甸湿地土壤养分因子与植物养分因子之间的耦合关系，以期为银川平原草甸湿地的生态保育与恢复提供科学依据。

1　研究区概况与研究方法

1.1　研究区概况

银川平原是在新生代断陷盆地基础上发育的堆

① **收稿日期：** 2018-08-02；　**修订日期：** 2019-01-29
基金项目： 国家自然科学基金项目（41761102）；宁夏大学研究生创新项目（GIP2018079）
作者简介： 苏芝屯（1992-），硕士研究生，主要从事于湿地生态修复与环境监测方面的研究. E-mail: suzhitun@163.com
通讯作者： 何彤慧. E-mail: hetonghui@163.com

chinaXiv:201909.00069v1

ChinaXiv合作期刊

积平原,南起青铜峡,北至石嘴山,西倚贺兰山,东傍鄂尔多斯台地,海拔 1 100 ~ 1 200 m,是全区地势最低之处。地理坐标 105°45′ ~ 107°00′E,37°50′ ~ 39°20′N。属于温带大陆性气候,降雨量少、蒸发强烈,年均降水量为 180 ~ 200 mm,年均蒸发量为 1 100 ~ 1 600 mm。银川平原草甸湿地的形成,一方面是在黄河自然状况下形成的河流湿地、滩涂湿地,另一方面是在开垦、开挖沟渠等人工工程下形成的沟渠湿地、库塘湿地等。

1.2 样地自然概况

结合已有研究的实验设计[16],于 2016 年 8—10 月在银川平原沟渠间的低洼地区、沟渠边缘、河漫滩等区域设置 8 个不同草甸湿地样区,开展对不同样区的植物样方调查,每个样区内调查 3 ~ 5 样方,在调查植被的同时将样方内所有植物齐地面收割,装入写有编号的塑封袋,并采用 5 点取样法采取每个调查样方内 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 40 cm 和 40 ~ 50 cm 的土壤。

样区内共出现植物 28 种,隶属于 10 科 23 属,莎草科(Cyperaceae)、禾本科(Poaceae)、菊科(Asteraceae)、藜科(Chenopodiaceae)为群落主要优势科。根据各样区内植被、土壤水分及盐分差异特征,将样区划分为沼泽草甸(2 个样区)、典型草甸(4 个样区)和盐生草甸(2 个样区)3 种类型。其中沼泽草甸主要物种为扁囊薹草(*Carex coriophora*)、寸草(*Carex duriuscula*)、水葫芦苗(*Halerpestes cymbalaria*)、藨草(*Scirpus triquete*),分别占物种数的 51%、7%、24%、15%,土壤含水率高但土壤盐分较低;典型草甸主要以拂子茅(*Calamagrostis epigeios*)、碱蓬(*Suaeda glauca*)、灰绿藜(*Chenopodium glaucum*)等为建群种,分别占总物种数的 60%、20%、15%;盐生草甸中植物物种数较为单一,主要为碱蓬与矮生芦苇(*Phragmites australis*),分别占总物种数的 97%、1%,土壤含水率和含盐量与沼泽草甸相反。

1.3 样品预处理

将采集的植物样品置于烘箱内,于 100 ℃杀青 30 min 后,将温度调至 65 ℃烘干至恒重,然后将每个样地植物样混合粉碎后过 0.25 mm 筛,用于测定植物的 C、N 和 P 含量。将风干后同一样地的 5 份土壤样品按层均匀混合后,研磨过 1 mm、0.25 mm 筛,分成 3 份保存,用于测定土壤理化性质。

1.4 理化分析实验与数据处理

采用土水比 1∶5,测定土壤 pH 与全盐,土壤全盐采用电导率仪(雷磁 DDSJ－308F 型号)测定,pH 采用 pH 计(雷磁 PHS－3G 型号)测定;采用经典烘干法测定土壤含水率;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾加热法测定;土壤 TN 采用凯氏定氮法测定;土壤全磷(TP)采用 $HClO_4-H_2SO_4$ 法测定;土壤速效钾(AK)采用 NH_4OAc 浸提,火焰光度法;土壤速效磷(AP)采用 0.5 $mol \cdot L^{-1}$ $NaHCO_3$ 法测定;碱解氮(AN)用 $NaOH-H_3BO_3$ 法测定;植物 C、N、P 含量由沈阳博实监测中心测定。

采用 Excel 10.0 对实验数据进行基本计算和制图;采用 SPSS 22.0 统计软件进行单因素方差与相关性分析;采用 Origin 9.0 进行土壤盐分、养分垂直变化分析制图;采用 Canoco for Windows 4.5 统计软件对植物养分数据进行趋势对应分析(DCA),在各排序轴特征值均小于 3 的基础上,采用冗余分析方法(RDA),将植物养分与土壤养分指标之间的关系反映在坐标轴上。

2 结果与分析

2.1 不同草甸湿地土壤养分特征分析

2.1.1 土壤养分水平差异性分析 从表 1 可以得知,土壤 TN 在 0 ~ 10 cm 土层中,3 种草甸生境间均具有显著性差异($P<0.05$);在 10 ~ 20 cm 土层,沼泽草甸显著高于盐生草甸($P<0.05$),与典型草甸间无显著性差异,后两者间亦无显著性差异;在 20 ~ 50 cm 土层,3 种生境草甸湿地之间均无显著性差异($P>0.05$)。土壤 TP 在 0 ~ 10 cm 土层,盐生草甸显著低于沼泽草甸和典型草甸($P<0.05$),而后两者间无显著性差异;在 10 ~ 50 cm 土层,3 种生境草甸湿地之间均无显著性差异($P>0.05$)。土壤 AP 在 3 种草甸生境的不同土层中均无显著性差异($P>0.05$)。土壤 AK 在 0 ~ 10 cm 土层中,典型草甸显著高于沼泽草甸和盐生草甸($P<0.05$),而后两者间无显著性差异;在 10 ~ 20 cm 土层,沼泽草甸显著低于典型草甸($P<0.05$),与盐生草甸间无显著性差异,而后两者间亦无显著性差异;在 20 ~ 30 cm、30 ~ 40 cm、40 ~ 50 cm 土层,3 种生境草甸湿地之间均无显著性差异($P>0.05$)。土壤 AN 在 0 ~ 10 cm 土层,3 种草甸生境间均具有显著性差异($P<0.05$);在 10 ~ 50 cm 土层,3 种生境草甸湿地之间均无显著性差异($P>0.05$)。

chinaXiv:201909.00069v1

ChinaXiv合作期刊

表 1　不同土层草甸湿地土壤养分特征值

Tab. 1　Eigenvalues of soil nutrients in different soil layers in meadow wetland

	土层深度/cm	TN/%	TP/%	AP/(mg·kg^{-1})	AK/(mg·kg^{-1})	AN/(mg·kg^{-1})
沼泽草甸	0~10	0.142±0.008Aa	0.060±0.002Aa	5.652±0.326Aa	186.233±16.522Ba	92.750±0.452Aa
	10~20	0.072±0.017Ab	0.044±0.008Aa	2.241±1.065Aa	59.220±17.786Bb	38.325±13.283Ab
	20~30	0.067±0.023Ab	0.042±0.008Aa	2.750±1.360Aa	50.741±18.365Ab	40.140±15.921ABb
	30~40	0.064±0.022Ab	0.041±0.008Aa	2.192±1.065Aa	52.685±16.912Ab	38.911±16.695Ab
	40~50	0.052±0.017Ab	0.042±0.009Aa	4.017±2.177Aa	82.752±35.368Ab	26.228±9.935Ab
典型草甸	0~10	0.085±0.010Bab	0.059±0.001Aa	7.224±0.820Aa	318.991±9.639Aa	57.564±4.709Bab
	10~20	0.049±0.006ABb	0.049±0.002Ab	1.744±0.210Ab	141.581±17.348Ab	37.077±1.332Abc
	20~30	0.092±0.022Aab	0.051±0.002Ab	1.828±0.107Ab	125.707±21.046Abc	78.464±18.887Aa
	30~40	0.153±0.056Aa	0.048±0.004Abc	1.382±0..088Ab	46.124±9.433Ac	29.104±7.522Ac
	40~50	0.049±0.009Ab	0.042±0.003Ac	1.413±0.270Ab	80.993±19.565Abc	33.345±3.114Abc
盐生草甸	0~10	0.044±0.007Ca	0.045±0.009Ba	8.583±4.323Aa	158.063±5.973Ba	28.805±9.000Ca
	10~20	0.039±0.007Ba	0.043±0.011Aa	6.550±3.610Aa	96.630±11.702ABb	21.265±7.471Aa
	20~30	0.037±0.007Aa	0.043±0.011Aa	4.643±2.400Aa	77.803±16.349Ab	21.295±6.506Ba
	30~40	0.035±0.006Aa	0.045±0.011Aa	3.470±1.840Aa	73.000±21.012Ab	22.678±5.741Aa
	40~50	0.036±0.006Aa	0.045±0.011Aa	3.768±2.002Aa	63.808±18.080Ab	21.455±6.896Aa

注:TN 表示土壤全氮,TP 表示土壤全磷,AP 表示土壤速效磷,AK 表示土壤速效钾,AN 表示土壤碱解氮;同列不同小写字母表示同一草甸湿地不同剖面土壤养分差异显著($P<0.05$),同一土层不同草甸湿地中大写字母表示同一剖面不同草甸湿地土壤养分差异显著($P<0.05$)。下同。

2.1.2　土壤养分垂直分布特征　从表 1 可见,盐生草甸的 TN、AN、AP、AK 最大值均出现在表层,但其在土层垂直方向上分布存在差异。TN 与 AN 自表层向下略微减小后基本保持不变,各土层之间土壤 TN、AN 差异性不显著($P>0.05$);土壤 AP 自表层先迅速减小,至 30~40 cm 土层后基本维持不变,含量减小为表层的 40.6%,其在土壤中垂直变幅较大,但差异性不显著($P>0.05$);表层 0~10 cm 土壤 AK 与 10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm 土层差异性显著($P<0.05$)。土壤 TP 最高值在 40~50 cm 土层,呈先减小后增大的趋势,但各土层之间差异性不显著($P>0.05$)。

沼泽草甸土壤 TP、TN、AP、AN、AK 最大值均出现在表层,且其在土壤垂直方向上变化趋势具有相似之处,大致表现为自表层向下先迅速减小后基本维持不变,均在 0~20 cm 土层变幅最大。但值得注意的是,土壤 TN、AN、AK 均表现为显著的表聚效应($P<0.05$),但 10~50 cm 各土层之间差异性不显著($P>0.05$);而土壤 TP、AP 则表聚效应不显著($P>0.05$),并且在各土层之间土壤 TP、AP 差异性也不显著($P>0.05$)。

典型草甸土壤 TP 在 0~10 cm 土层呈显著的富集效应($P<0.05$),其在垂直方向上表现为先减小再增大然后继续减小的趋势,底层土壤的 TP 含量为表层的 71.19%;土壤 TN 在 30~40 cm 土层富集效应显著,与 10~20 cm、40~50 cm 土层差异性显著($P<0.05$);AN 在 20~30 cm 土层富集效应显著($P<0.05$),在土壤中的含量表现为:自表层向下至 10~20 cm 减小,然后迅速增大,达到最大值后又迅速减小;土壤中 AP 与 AK 呈显著的表聚效应($P<0.05$),且 10 cm 以下各土层之间差异性不显著($P>0.05$),两者均自表层向下先迅速减小后基本维持不变,但值得注意的是,典型草甸土壤 AP 在 0~20 cm 土层变化幅度较大,而土壤 AK 则是在0~40 cm 土层变化显著。

2.2　土壤养分各指标相关性

由表 2 可知,土壤中 TN 与 SOC、AN 呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为 0.913、0.648,与 TP 呈显著正相关($P<0.05$),相关系数为0.624,与 AK、AP 均无显著相关性;TP 与 SOC、AK、AN 均呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为 0.737、0.812、0.778,与 AP 没有相关性;SOC 与 AN 呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数为 0.866,与 AP、AK 均无相关性;AP 与 AK 呈显著正相关($P<0.05$),

chinaXiv:201909.00069v1

ChinaXiv合作期刊

表 2　草甸湿地土壤养分指数相关性分析

Tab. 2　Correlation analysis between soil nutrient indexes in meadow wetland

	TN	TP	SOC	AP	AK	AN
TN	1					
TP	0.624 *	1				
SOC	0.913 **	0.737 **	1			
AP	-0.157	0.307	-0.095	1		
AK	0.202	0.812 **	0.411	0.608 *	1	
AN	0.648 **	0.778 **	0.866 **	0.025	0.528 *	1

注:SOC 表示土壤有机碳; * * 表示相关性在 $P<0.01$ 水平(双侧)上显著相关, * 表示相关性在 $P<0.05$ 水平(双侧)上显著相关。

与 AN 无相关性; AK 与 AN 呈显著正相关($P<0.05$)。

2.3　草甸湿地植物养分与土壤养分的关系

2.3.1　植物养分特征　土壤 C、N 和 P 元素是植物生长发育和繁殖所必需的大量营养元素[17],而某些关键因子又可以通过影响土壤动物的活动来影响土壤养分的可利用性和植物对营养元素的吸收利用[18-19]。由表 3 可知,C∶P 在沼泽草甸生境中显著小于典型草甸与盐生草甸($P<0.05$),而后两者间无显著性差异;C∶N 和 N∶P 在不同草甸湿地生境中差异性不显著($P>0.05$)。

2.3.2　植物养分与土壤养分因子间的相互关系　排序结果表明,植物养分与土壤养分排序模型达到显著水平($P<0.05$)。由表 4 可知,第 1、2 排序轴特征值分别为 0.944、0.005,两个排序轴共解释了 94.8% 的植物养分特征和 95.5% 的植物养分与土壤养分关系。由此可知,第 1、2 轴能够很好地反映土壤因子与植物养分的相关关系。此外,第 1、2 排序轴植物养分与土壤因子相关系数分别为 0.974、0.963,进一步反映出植物养分因子与土壤养分因子关系密切。

图 1 中轴 1 主要代表了土壤 TP、AP、AN、SOC、TN 变化,轴 2 主要代表了土壤 AK 的变化。箭头连线的夹角表示土壤养分与植物养分的相关性,夹角为 0° ~ 90° 表示两个变量之间呈正相关,夹角为 90° ~ 180° 表示二者之间呈负相关,夹角为 90° 表示两者之间没有显著的相关关系;箭头连线长度表示土壤养分因子对植物养分影响程度的大小。由图 1 可以看出,草甸湿地植物 N∶P 与土壤 AN、SOC、TP、AP 呈负相关,且土壤养分因子影响程度表现为 AN、SOC 较大;植物 C∶P、C∶N 与土壤各养分因子均呈负相关。

表 3　不同草甸湿地植物养分特征

Tab. 3　Characteristics of plant nutrients in different meadow wetlands

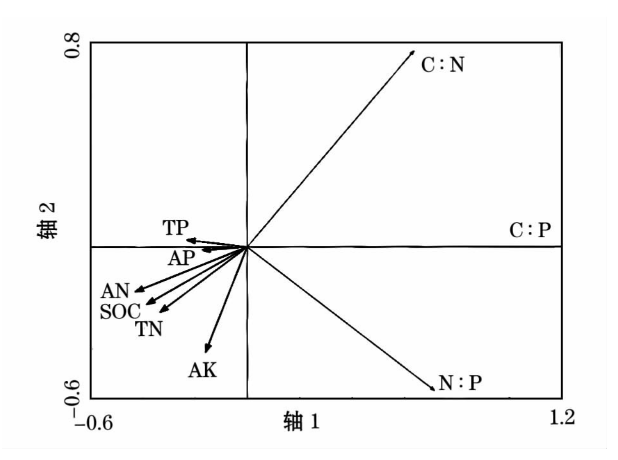
	C∶N	C∶P	N∶P
沼泽草甸	14.67 ±1.38a	78.35 ±8.78b	5.66 ±1.13a
典型草甸	25.50 ±6.50a	249.11 ±26.65a	10.93 ±1.98a
盐生草甸	24.32 ±0.40ab	311.29 ±70.39a	12.85 ±3.10a

注:同列不同小写字母表示不同草甸湿地的土壤养分比差异显著($P<0.05$)。

表 4　草甸湿地植物养分特征与土壤因子的冗余分析结果

Tab. 4　Redundancy analysis for plant nutrient characteristics and soil factors in meadow wetland

排序轴	特征值	植物 - 土壤因子相关系数	植物特征累计解释量/%	植物 - 土壤因子关系累计解释量/%
1	0.944	0.974	94.4	99.5
2	0.005	0.963	94.8	100



注:TN 表示土壤全氮,TP 表示土壤全磷,AP 表示土壤速效磷,AK 表示土壤速效钾,AN 表示土壤碱解氮,SOC 表示土壤有机碳。

图 1　草甸湿地植物养分与土壤养分因子的冗余分析二维排序图

Fig. 1　Redundancy analysis of two-dimensional ordination of plant nutrients and soil nutrients in meadow wetland

3　结论与讨论

3.1　草甸湿地土壤养分特征

在宏观尺度上,土壤母质和气候是影响土壤养分的重要因素[19];而在微观尺度上,生物因素则为主导因素之一[20]。有研究表明,植物对土壤元素的选择性吸收、枯落分解速率不同造成的归还差异以及土壤水分状况等[21-23],最终均以土壤元素的差异所体现。在本研究中草甸湿地之间土壤养分在土层

chinaXiv:201909.00069v1

ChinaXiv合作期刊

0~20 cm 处差异显著。是由于距地表 20 cm 处不仅是草甸湿地植物根系分布的集中区,而且还可以反映植物对土壤资源的利用状况[24-25]。此外,土壤 TP 在 3 种草甸湿地的水平梯度上分布的趋同性是由于土壤中的 P 元素主要来源于土壤风化,而土壤风化又是一个较为漫长的过程[26],导致 P 元素在草甸湿地表层土壤中含量较低。

在本研究中,草甸湿地土壤养分随土壤深度的加深呈现出不同程度的减小趋势。其中,TP 在草甸湿地土壤中垂直变化不显著,这是由于 P 元素在土壤中的迁移率低,导致 P 元素在区域空间分布较为均匀[27]。TN、AN 在盐生草甸中垂直变化不显著,一方面是由于盐生草甸中的土壤 N 元素主要来源于植物枯落物的分解[28],以及在土壤中的含量、分布和矿化作用受到植物群落、水分及温度等因素的影响[29-31];另一方面,由于盐生草甸中较低的干湿交替频率所导致,这与聂兰琴等[12]对鄱阳湖湿地的研究结果相似。AP、AK 在草甸湿地土壤垂直方向上的变化是由于植物根系影响了土壤养分的有效性,使其对植物根际变化响应敏感度高于全量养分[32]。而且,其速效养分在草甸湿地土壤垂直方向上的变化与生境内植物根系所到达的深度及其根系密度密切相关。

3.2 土壤养分因子相关性

研究发现,草甸湿地土壤 SOC 与 TN 和 TP 之间存在显著正相关,而 AN 与 TN、TP 之间亦存在显著正相关,说明研究区域土壤的 C、N 和 P 含量的消涨是一致的[33]。一方面可能是由于生态系统 N 饱和时土壤酸化,土壤微生物的活动受到抑制,土壤 SOC 的分解降低[34];另一方面,土壤 P 的动态变化会影响土壤 C、N 等元素的生物地球化学循环[35]。研究还发现,AK 与 TP、AP、AN 均具有显著正相关,可能与草甸湿地自身的土壤特性及丰富的资源物质相关,这与李欣尧等[36]的研究结果相似。

3.3 植物养分特征及其与土壤养分因子的关系

在本研究中,相对而言,沼泽草甸植物低 C 高 P(N),典型草甸与盐生草甸植物高 C 低 P(N),表明在单位 N、P 养分环境下,沼泽草甸植物建成效率较高,这与陈嘉茜等[37]对芒萁和乌毛蕨叶片 C∶N、C∶P 研究结果相似。本研究发现,草甸湿地植物 N∶P<14,且受到土壤 SOC、AN 的显著影响。可能是由于土壤 AN 对植物 N 元素含量的影响以及生境和物种因素的协同作用[38];土壤 C 通过影响土壤其他养分元素的活性来间接影响植物养分的变化。植物 C∶N、C∶P 很大程度上受 N、P 的影响,本研究结果表明,随着土壤养分含量的增加,草甸湿地植物 C∶N、C∶P 均呈减小趋势,出现这种结果可能是本研究实验样地土壤水分对土壤养分的影响造成的,也可能是样地中某种植物对环境特殊响应的结果。但在本研究中土壤 AP 对植物养分的影响不显著,这与已有研究结果不同[39],可能是由于 P 元素周转相对比较缓慢,导致土壤中能被植物吸收的 AP 供应不足,从而出现土壤 P 与植物 P 耦合性较差的现象[40]。

综上所述,通过对沼泽草甸、典型草甸、盐生草甸 3 种草甸湿地土壤养分特征及其对植物养分影响的研究发现:① 除土壤 TP 外,3 种草甸湿地之间土壤养分在 0~20 cm 处存在显著性差异($P<0.05$)。② 土壤 TN 与 AN 在盐生草甸中垂直变化不显著($P>0.05$),但在典型草甸与沼泽草甸垂直方向上波动大;TP 在草甸湿地土壤中垂直变化不显著($P>0.05$);AP 与 AK 在草甸湿地表层具有一定程度的富集效应,并且在不同草甸湿地各土层垂直方向上变化显著($P<0.05$)。③ 土壤中 SOC 与 TN、TP、AN 呈极显著正相关($P<0.01$),相关系数分别为 0.913、0.737、0.866;AN 与 TN、TP 之间也呈显著正相关($P<0.01$),相关系数为 0.648、0.778;AK 与土壤 P 也存在显著相关($P<0.05$)。④ 草甸湿地植物养分均表现为 N 限制,其中 C∶N、C∶P 与土壤养分呈负相关,植物 N∶P 受 SOC、AN 影响较为显著。

参考文献(References):

〔1〕 赖建东,田昆,郭雪莲,等. 纳帕海湿地土壤有机碳和微生物量碳研究〔J〕. 湿地科学,2014,12(1):49-54.〔Lai Jiandong, Tian Kun, Guo Xuelian, et al. Organic carbon and microbial biomass carbon in soil in Napahai wetlands〔J〕. Wetland Science, 2014,12(1):49-54.〕

〔2〕 蔡倩倩,郭志华,胡启鹏,等. 若尔盖高寒嵩草草甸湿地不同水分条件下土壤有机碳的垂直分布〔J〕. 林业科学,2013,49(3):9-16.〔Cai Qianqian, Guo Zhihua, Hu Qipeng, et al. Vertical distribution of soil organic carbon and carbon storage under different hydrologic conditions in Zoigê Alpine Kobresia meadows wetland〔J〕. Scientla Silvae Sinicae, 2013,49(3):9-16.〕

〔3〕 马维伟,王辉,王跃思,等. 甘南尕海草甸湿地不同海拔高度土壤性状研究〔J〕. 草地学报,2012,20(6):1 044-1 050.〔Ma Weiwei, Wang Hui, Wang Yuesi, et al. Soil properties of meadow

chinaXiv:201909.00069v1

ChinaXiv合作期刊

wetlands for different altitudes in Gahai of Ganan〔J〕. Acta Agrestia sinica,2012,20(6):1 044 – 1 050.〕

〔4〕 王丽,杨涛,杜红霞,等.不同水位梯度下拉鲁湿地典型湿草甸植物群落特征〔J〕.植物资源与环境学报,2018,27(1):11 – 16.〔Wang Li,Yang Tao,Du Hongxia,et al. Plant community characteristics of typical wet meadow in Lalu wetland under different water level gradients〔J〕. Journal of Plant Resources and Environtment,2018,27(1):11 – 16.〕

〔5〕 王丽,张镱锂,王兆锋,等.放牧及水文扰动对拉萨地区湿草甸湿地土壤特征的影响〔J〕.水土保持研究,2013,20(1):66 – 69.〔Wang Li,Zhang Yili,Wang Zhaofeng,et al. Effect of grazing and hydrological disturbance on soil properties of wet meadow wetland in Lhasa〔J〕. Research of Soil and Water Conservation,2013,20(1):66 – 69.〕

〔6〕 王丽,王兆锋,张镱锂,等.火烧对拉萨地区湿草甸湿地土壤养分特征的影响〔J〕.环境科学研究,2013,26(5):549 – 554.〔Wang Li,Wang Zhaofeng,Zhang Yili,et al. Effects of fire burning on wet meadow soil nutrient conditions in Lhasa〔J〕. Research of Environmental Sciences,2013,26(5):549 – 554.〕

〔7〕 何彤慧.银川平原不同类型湿地的历史演变〔J〕.人民黄河,2016.38(4):54 – 58.〔He Tonghui. Historical evolution of different wetlands types in the Yinchuan Plain〔J〕. Yellow River,2016,38(4):54 – 58.〕

〔8〕 夏贵菊,何彤慧,于骥,等.银川平原草甸湿地盐土及其盐分分布特征〔J〕.土壤,2016,48(4):785 – 792.〔Xia Guiju,He Tonghui,Yu Ji,et al. Salt profile distributions of meadow wetland in Yinchuan Plain〔J〕. Soils,2016,48(4):785 – 792.〕

〔9〕 夏贵菊,何彤慧,于骥,等.银川平原草甸湿地表层土盐分累积特征〔J〕.农业工程学报,2016,32(5):142 – 148.〔Xia Guiju,He Tonghui,Yu Ji,et al. Salt accumulation characteristics of topsoil in meadow wetland in Yinchuan plain〔J〕. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(5):142 – 148.〕

〔10〕 缑倩倩,屈建军,王国华,等.中国干旱半干旱地区湿地研究进展〔J〕.干旱区研究,2015,32(2):213 – 220.〔Gou Qianqian,Qu Jianjun,Wang Guohua,et al. Process of wetland researches in arid and semi-arid regions in China〔J〕. Arid Zone Research,2015,32(2):213 – 220.〕

〔11〕 曹祥会,龙怀玉,周脚根,等.中温 – 暖温带表土碳氮磷生态化学计量特征的空间变异性——以河北省为例〔J〕.生态学报,2017,37(18):6 053 – 6 063.〔Cao Xianghui,Long Huaiyu,Zhou Jiaogen,et al. Spatial variation of ecological stoichiometry characteristics of topsoil carbon,nitrogen and phosphorus in Hebei Province,China〔J〕. Acta Ecological Sinica,2017,37(18):6 053 – 6 063.〕

〔12〕 聂兰琴,吴琴,尧波,等.鄱阳湖湿地优势植物叶片 – 凋落物 – 土壤碳氮磷化学计量特征〔J〕.生态学报,2016,36(7):1 898 – 1 906.〔Nie Lanqin,Wu Qin,Yao Bo,et al. Leaf litter and soil carbon,nitrogen,and phosphorus stoichiometry of dominant plant species in the Poyang Lake wetland〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2016,36(7):1 898 – 1 906.〕

〔13〕 杜改俊,李艳红,张小萌,等.艾比湖湿地典型植物群落土壤养分和盐分的空间异质性〔J〕.生态环境学报,2015,24(8):1 302 – 1 309.〔Du Gaijun,Li Yanhong,Zhang Xiaomeng,et al. Spatial heterogeneity of the soil nutrient and salinity of the typical plant communities in Ebinur Lake Wetland〔J〕. Ecology and Environmental Sciences,2015,24(8):1 302 – 1 309.〕

〔14〕 肖烨,商丽娜,黄志刚,等.吉林东部山地沼泽湿地土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量学特征〔J〕.地理科学,2014,34(8):994 – 1 001.〔Xiao Ye,Shang Lina,Huang Zhigang,et al. Ecological stoichiometry characteristics of soil carbon,nitrogen and phosphorus in mountain swamps of Eastern Jilin Province〔J〕. Scientia Geoeraphica Sinica,2014,34(8):994 – 1 001.〕

〔15〕 Song Y Y,Song C C,Ren J S,et al. Influence of nitrogen additions on litter decomposition,nutrient dynamics,and enzymatic activity of two plant species in a peatland in Northeast China〔J〕. Sciense of the Total Environment,2018,625:640 – 646.

〔16〕 丁小慧,宫立,王东波,等.放牧对呼伦贝尔草地植物和土壤生态化学计量学特征的影响〔J〕.生态学报,2012,32(15):4 722 – 4 730.〔Ding Xiaohui,Gong Li,Wang Dongbo,et al. Grazing effects on eco-stoichiometry of plant and soil in Hulumbeir,Inner Mogolia〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2012,32(15):4 722 – 4 730.〕

〔17〕 李从娟,徐新文,孙永强,等.不同生境下三种荒漠植物叶片及土壤 C、N、P 的化学计量特征〔J〕.干旱区地理,2014,37(5):996 – 1 004.〔Li Congjuan,Xu Xinwen,Sun Yongqiang,et al. Stoichiometric characteristics of C,N,P for three desert plants leaf and soil at different habitats〔J〕. Arid Land Geography,2014,37(5):996 – 1 004.〕

〔18〕 Zhang D,Wang C,Li X L,et al. Linking plant ecological stoichiometry with soil nutrient and bacterial communities in apple orchards〔J〕. Applied Soil Ecology,2018,126:1 – 10.

〔19〕 Cavagnaro T R. Soil moisture legacy effects: Impacts on soil nutrients,plants and mycorrhizal responsiveness〔J〕. Soil Biology and Biochemestry,2016,95:173 – 179.

〔20〕 吕永磊,梁文业,张仲胜.西藏地区典型泥炭地土壤理化性质及其碳、氮、磷化学计量学特征〔J〕.湿地科学,2017,15(4):526 – 531.〔Lü Yonglei,Liang Wenye,Zhang Zhongsheng. Physicochemical property of soils in typical peatlands in Tibet Area and their stoichiometry characteristics of carbon,nitrogen and phosphorus〔J〕. Wetland Science,2017,15(4):526 – 531.〕

〔21〕 李占斌,周波,马田田,等.黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响〔J〕.水土保持学报,2017,31(6):312 – 318.〔Li Zhanbin,Zhou Bo,Ma Tiantian,et al. Effects of ecological management on characteristics of soil carbon,nitrogen phosphorus and their stoichiometry in Loess Hilly Region,China〔J〕. Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(6):312 – 318.〕

〔22〕 路嘉丽,沈光,王琼,等.落叶松、水曲柳、樟子松和农田土壤指标差异及其综合比较〔J〕.生态学报,2017,37(10):3 543 –

chinaXiv:201909.00069v1

ChinaXiv合作期刊

3 552.〔Lu Jiali,Shen Guang,Wang Qiong,et al. Larch,ash,scots pine,and farmland-induced differences on soil parameters and their comprehensive analyses〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2017,37(10):3 543 – 3 552.〕

〔23〕Duan H,Wang L,Zhang Y N,et al. Variable decomposition of two plant litters and their effects on the carbon sequestration ability of wetland soil in the Yangtze River estuary〔J〕. Geoderma,2018,319:230 – 238.

〔24〕郭京衡,李尝君,曾凡江,等. 2 种荒漠植物根系生物量分布与土壤水分、养分的关系〔J〕. 干旱区研究,2016,33(1):166 – 171.〔Guo Jingheng,Li Changjun,Zeng Fanjiang,et al. Relationship between root biomass distribution and moisture nutrient for two desert plant species〔J〕. Arid Zone Research,2016,33(1):166 – 171.〕

〔25〕淑敏,姜涛,王东丽,等. 科尔沁沙地不同林龄樟子松人工林土壤生态化学计量特征〔J〕. 干旱区研究,2018,35(4):789 – 795.〔Shu Min,Jiang Tao,Wang Dongli,et al. Soil ecological stoichiometry under the planted of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* forests with different stand ages in the Horqin Sandy Land〔J〕. Arid Zone Research,2018,35(4):789 – 795.〕

〔26〕张立华,陈小兵. 盐碱地柽柳"盐岛"和"肥岛"效应及其碳氮磷生态化学计量学特征〔J〕. 应用生态学报,2015,26(3):653 – 658.〔Zhang Lihua,Chen Xiaobing. Characteristics of 'salt island' and 'fertile island' for *Tamarix chinensis* and soil carbon,nitrogen and phosphorus ecological stoichiometry in saline-alkali land〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2015,26(3):653 – 658.〕

〔27〕李丹维,王紫泉,田海霞,等. 太白山不同海拔土壤碳、氮、磷含量及生态化学计量特征〔J〕. 土壤学报,2017,54(1):160 – 170.〔Li Danwei,Wang Ziquan,Tian Haixia,et al. Carbon,nitrogen and phosphorus contents in soils on Taibai Mountain and their ecological stoichiometry relative to elevation〔J〕. Acta Pedlological Sinica,2017,54(1):160 – 170.〕

〔28〕周正虎,王传宽,张全智. 土地利用变化对东北温带幼龄林土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响〔J〕. 生态学报,2015,35(20):6 694 – 6 702.〔Zhou Zhenghu,Wang Chuankuan,Zhang Quanzhi. The effect of land use change on soil carbon,nitrogen,and phosphorus contents and their stoichiometry in temperate sapling stands in Northeastern China〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2015,35(20):6 694 – 6 702.〕

〔29〕青烨,孙飞达,李勇,等. 若尔盖高寒退化湿地土壤碳氮磷比及相关性分析〔J〕. 草业学报,2015,24(3):38 – 47.〔Qing Ye,Sun Feida,Li Yong,et al. Analysis of soil caibon,nitrogen and phosphorus in degraded alpine wetland,Zoige,Southwest China〔J〕. Acta Prataculturas Sinica,2015,24(3):38 – 47.〕

〔30〕闫慧,吴茜,丁佳,等. 不同降水及氮添加对浙江古田山 4 种树木幼苗光合生理生态特征与生物量的影响〔J〕. 生态学报,2013,33(14):4 226 – 4 236.〔Yan Hui,Wu Qian,Ding Jia,et al. Effect of precipitation and nitrogen addition on photosynthetically eco-physiological characteristics and biomass of four tree seedlings in Gutian Mountain,Zhejiang Province,China〔J〕. Acta Ecologica Sinica,2013,33(14):4 226 – 4 236.〕

〔31〕朱海强,李艳红,李发东. 近 10 年艾比湖湿地不同植物群落土壤水分—盐分—养分变化特征〔J〕. 西北植物学报,2018,38(3):535 – 543.〔Zhu Haiqiang,Li Yanhong,Li Fadong. Characteristics of soil moisture,salinity and nutrients in different plant communities of Ebinur Lake wetland during the past decade〔J〕. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2018,38(3):535 – 543.〕

〔32〕胡芳,杜虎,曾馥平,等. 典型喀斯特峰丛洼地不同植被恢复对土壤养分含量和微生物多样性的影响〔J〕. 生态学报,2018,38(6):2 170 – 2 179.〔Hu Fang,Du Hu,Zeng Fuping,et al. Dynamics of soil nutrient content and microbial diversity following vegetation restoration in a typical karst peak cluster depression landscape〔J〕. Acta Ecological Sinica,2018,38(6):2 170 – 2 179.〕

〔33〕韩华,王昊彬,余华光,等. 崇明滩涂湿地不同盐度梯度下芦苇种群及土壤的生态化学计量学特征〔J〕. 长江流域资源与环境,2015,24(5):816 – 823.〔Han Hua,Wang Haobin,Yu Huaguang,et al. Ecological stoichiometry of carbon,nitrogen and phosphorus of *Phragmites australis* population under soil salinity gradients in Chongming wetlands〔J〕. Resources and Environment in the Yangtze Basin,2015,24(5):816 – 823.〕

〔34〕汤松波,习丹,任文丹,等. 鹤山不同植被土壤有机碳分布特征〔J〕. 土壤,2018,50(1):122 – 130.〔Tang Songbo,Xi Dan,Ren Wendan,et al. Characteristics of soil organic carbon under different forest types in Heshan of Southern China〔J〕. Soils,2018,50(1):122 – 130.〕

〔35〕曾全超,李鑫,董扬红,等. 黄土高原延河流域不同植被类型下土壤生态化学计量学特征〔J〕. 自然资源学报,2016,31(11):1 881 – 1 891.〔Zeng Quanchao,Li Xin,Dong Yanghong,et al. Ecological stoichiometry of soils in the Yanhe watershed in the Loess Plateau:The influence of different vegetation zones〔J〕. Journal of Natural Resources,2016,31(11):1 881 – 1 891.〕

〔36〕李新尧,杨联安,杨煜岑,等. 猕猴桃园和小麦—玉米轮作田两种土地利用方式对土壤养分状况的影响〔J〕. 干旱地区农业研究,2018,36(1):28 – 35.〔Li Xinrao,Yang Lian'an,Yang Yuceng,et al. Effects of kiwifruit trees planting and wheat-maize rotation planting on the status of soil nutrients〔J〕. Agricultural Research in the Arid Areas,2018,36(1):28 – 35.〕

〔37〕陈嘉茜,张玲玲,李炯,等. 蕨类植物碳氮磷化学计量特征及其与土壤养分的关系〔J〕. 热带亚热带植物学报,2014,22(6):567 – 575.〔Chen Jiaqian,Zhang Lingling,Li Jiong,et al. Carbon,nitrogen and phosphorus stoichiometry of two fern species and their relationships to nutrient availability〔J〕. Journal of Tropical and Subtropical Botany,2014,22(6):567 – 575.〕

〔38〕胡耀升,么旭阳,刘艳红. 长白山森林不同演替阶段植物与土壤氮磷的化学计量特征〔J〕. 应用生态学报,2014,25(3):632 – 638.〔Hu Yaosheng,Yao Xuyang,Liu Yanhong. N and P stoichiometric traits of plant and soil in different forest succession

chinaXiv:201909.00069v1

ChinaXiv合作期刊

stages in Changbai Mountains〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology,2014,25(3):632 – 638.〕

〔39〕 曾昭霞,王克林,刘孝利,等. 桂西北喀斯特森林植物—凋落物—土壤生态化学计量特征〔J〕. 植物生态学报,2015,39(7):682 – 693.〔Zeng Zhaoxia,Wang Kelin,Liu Xiaoli,et al. Stoichiometric characteristics of plants,litter and soils in karst plant communities of North-West Guangxi〔J〕. Chinese Journal of Plant Ecology,2015,39(7):682 – 693.〕

〔40〕 赵维俊,刘贤德,金铭,等. 祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征〔J〕. 土壤学报,2016,53(2):477 – 489.〔Zhao Weijun,Liu Xiande,Jin Ming,et al. Ecological stoichiometric characteristics of carbon,nitrogen and phosphorus in leaf-litter-soil system of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains〔J〕. Acta Pedologica Sinica,2016,53(2):477 – 489.〕

Soil Nutrient Characteristics and Plant Response in Meadow Wetland in the Yinchuan Plain

SU Zhi-tun[1,2], WU Chun-yan[1,2], HE Tong-hui[1,2], QIAO Bin[1,2], FENG Yan-qiong[1,2], WANG Xiao-ping[3]

(1. *Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degenerated Ecosystem under the Ministry of Education*, *Ningxia University*, *Yinchuan* 750021, *Ningxia*, *China*;
2. *Breeding Base of Key Laboratory for Preventing Land Degradation and Ecological Restoration*, *Ningxia University*, *Yinchuan* 750021, *Ningxia*, *China*;
3. *Yinchuan Wetland Management Office*, *Yinchuan* 750004, *Ningxia*, *China*)

Abstract: In this study, three types of meadow wetlands (marsh meadows, typical meadows and salty meadows) in the Yinchuan Plain were selected as the research subjects. An analysis of soil nutrients and plant nutrients was conducted with classical statistical methods through field investigation and laboratory analysis. The main conclusions are as follows: ① At the horizontal gradient, except for soil total phosphorus (TP), the difference of soil nutrient level in soil layer of 0 – 20 cm in depth among the three meadow wetlands was obvious ($P < 0.05$). ② The vertical variation of soil total nitrogen (TN) and soil alkali-hydrolyzed nitrogen (AN) in the salty meadow was not obvious ($P > 0.05$), but the vertical fluctuation in the typical meadow and swamp meadow was larger. The vertical change of TP in meadow wetland soil was not obvious ($P > 0.05$). An enrichment of soil available phosphorus (AP) and available potassium (AK) occurred in topsoil in the meadow wetland to a certain extent, and the vertical change was very obvious ($P < 0.05$). ③ The change trends of C, N and P contents in soil were consistent. There was a significant correlation between soil AK content and soil P content ($P < 0.05$). ④ Plant nutrients in the meadow wetland was affected by N, in which the C∶N and C∶P were negatively correlated with soil nutrients, and plant N∶P was significantly affected by soil organic carbon (SOC) and AN.

Key words: meadow wetland; soil nutrient; plant nutrient; Yinchuan Plain

chinaXiv:201909.00069v1